

Identificação e Equalização de Canais FIR Variantes no Tempo Utilizando Marca d'Água

Mário Uliani Neto, Leandro de C. T. Gomes e João Marcos T. Romano

Resumo—Propomos aqui um método de identificação e equalização para sistemas FIR variantes no tempo baseado no uso de uma *marca d'água digital* como sinal de referência. A marca d'água é continuamente inserida no sinal transmitido e é conhecida no receptor, sendo utilizada para rastrear as características do sistema ao longo do tempo por meio da comparação entre o sinal recebido e a marca d'água original. Tanto a transmissão de informação útil como a adaptação do filtro identificador/equalizador nunca são interrompidas. Resultados experimentais ilustram o funcionamento do método para alguns exemplos de sistemas variantes no tempo.

Palavras-Chave—Identificação adaptativa, equalização adaptativa, sistema variante, marca d'água digital.

Abstract—We propose a method for identification and equalization of FIR time-variant systems based on the use of a *digital watermark* as reference signal. The watermark is continuously inserted into the transmitted signal and is known at the receiver, which allows the algorithm to track system characteristics throughout time by comparing the received signal and the original watermark. The transmission of useful information and the adaptation of the identification/equalization filter are never interrupted. Experimental results illustrate the method for some instances of time-variant systems.

Keywords—Adaptive identification, adaptive equalization, time-varying system, digital watermark.

I. INTRODUÇÃO

Métodos tradicionais de identificação e equalização adaptativa supervisionada usam seqüências de treinamento como sinal de referência. O paradigma destes métodos consiste em interromper periodicamente a transmissão de informação para enviar uma seqüência de treinamento capaz de estimular os diversos aspectos da resposta do sistema. Conhecendo-se a seqüência de treinamento transmitida e o sinal observado na saída do sistema, os coeficientes do filtro identificador/equalizador podem ser ajustados. Exemplos de algoritmos que tradicionalmente utilizam a abordagem citada são o LMS e o RLS [1].

Neste cenário, o sinal que carrega informação é interrompido durante a transmissão das seqüências de treinamento. Em aplicações de tempo real, estas interrupções podem ser indesejáveis ou mesmo inaceitáveis. Uma formulação alternativa para evitar-se o uso de seqüências de treinamento é recorrer

às técnicas cegas ou não-supervisionadas, que não contam com sinal de referência, baseando-se geralmente na análise de estatísticas de ordem superior do sinal. Um dos grandes desafios enfrentados por estas técnicas é a possibilidade de existência de múltiplos ótimos locais e de a resposta do sistema variar em função do tempo. Embora ferramentas computacionais adaptadas à otimização de funções multimodais e/ou variantes no tempo tenham sido propostas na literatura [2], [3], os métodos cegos apresentam um grau de dificuldade e um custo computacional muito superiores aos das técnicas supervisionadas.

Propomos aqui um método de identificação e equalização para sistemas FIR variantes no tempo baseado no uso de uma *marca d'água digital* como sinal de referência. A marca d'água é um sinal de natureza similar à do sinal de informação (dito *hospedeiro*) e é continuamente inserida neste último ao longo do tempo. Ambos os sinais são simultaneamente transmitidos através do sistema que se deseja identificar ou equalizar. Assim como uma seqüência de treinamento, a marca d'água é conhecida no receptor, sendo utilizada para estimar as características relevantes do sistema. Neste esquema, ambos os sinais (de marca d'água e hospedeiro) são transmitidos continuamente, de modo que não haja interrupções na comunicação e os coeficientes do filtro identificador/equalizador possam ser constantemente atualizados, rastreando as variações do sistema ao longo do tempo.

Para que não haja interferências entre a marca d'água e o sinal hospedeiro, o sinal hospedeiro e a marca d'água devem ser independentes entre si. Além disso, parte da potência do sinal transmitido deve ser utilizada para a marca d'água, o que implica em uma redução da potência do sinal de informação. O sucesso desta abordagem dependerá de uma adequada escolha de potências, refletida na relação sinal-marca d'água (SWR, do inglês *signal-to-watermark ratio*).

Uma técnica similar à que propomos é conhecida como *superimposed pilot training* [4], [5]. Esta técnica baseia-se na sobreposição ao sinal de informação de uma seqüência de dados piloto conhecida, após a etapa de modulação de um sistema de comunicação. A seqüência piloto é detectada no receptor e usada para identificar o canal de transmissão. A principal diferença entre esta técnica e os métodos de marca d'água é o conceito de *transparência* que norteia estes últimos: a marca d'água deve ser construída de forma tal que, quando encarada como um ruído adicionado ao sinal hospedeiro, sua influência na detecção e/ou percepção do sinal transmitido seja insignificante caso sejam utilizados receptores legados (i.e. não preparados para detectar o sinal de marca d'água). Dependendo da natureza do sinal de informação, modelos perceptuais podem ser utilizados no transmissor para

Mário Uliani Neto e Leandro de C. T. Gomes, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), Rod. Campinas-Mogi-Mirim (SP 340), km 118,5, CEP 13086-902, Campinas, SP, Brasil; Tel: (19) 3705-6724; e-mail: {uliani, tgomes}@cpqd.com.br.

João Marcos T. Romano, DSPCom - Lab. de Proc. de Sinais para Comunicações Móveis - Fac. de Eng. Elétrica e de Computação - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Caixa Postal 6101, CEP 13083-970, Campinas, SP, Brasil; Tel.: (19) 3521-3703, Fax: (19) 3289-1395; e-mail: romano@decom.fee.unicamp.br.

garantir a transparência da marca d'água. A preocupação com a transparência inexistente na técnica de *superimposed training*.

O artigo está estruturado como descrevemos a seguir. Nas seções 2 e 3, são introduzidos os métodos de equalização e identificação adaptativas utilizando marca d'água. Na seção 4, são discutidos dois cenários de simulação com sistemas variantes no tempo, sendo apresentados os respectivos resultados experimentais. Finalmente, a seção 5 traz algumas conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

II. EQUALIZAÇÃO ADAPTATIVA UTILIZANDO MARCA D'ÁGUA

O sistema de equalização supervisionada aqui discutido foi apresentado em [6], [7]. Uma marca d'água é transmitida continuamente, sobreposta ao sinal de informação, de forma $s(n) = t(n) + \alpha_m m(n)$, onde $t(n)$ é o sinal de informação, $m(n)$ é a marca d'água e α_m é um fator de escala. A marca d'água escalonada é utilizada como sinal de referência no filtro equalizador, produzindo uma função custo que expressa o critério de Wiener: $J = E[|y(n) - d(n)|^2]$, onde $d(n)$ é o sinal de referência e $y(n)$ o sinal na saída do equalizador [1]. A solução é obtida através da minimização da função custo com respeito aos coeficientes do equalizador \mathbf{w} . Os coeficientes \mathbf{w}_o do equalizador ótimo são:

$$\mathbf{w}_o = \arg \left(\min_{\mathbf{w}} E \left[|e(n)|^2 \right] \right) \quad (1)$$

A matriz de correlação \mathbf{R} de dimensão $M \times M$ no equalizador é expressa, neste caso, como:

$$\mathbf{R} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) \mathbf{m}^T(n)] \mathbf{H}^T + \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)] \mathbf{H}^T \quad (2)$$

onde α_m^2 é a variância da marca d'água, $\mathbf{m}(n)$ e $\mathbf{t}(n)$ são, respectivamente, os vetores com M elementos relativos à marca d'água e ao sinal de informação; $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{(M+N+1) \times (M+1)}$ é uma matriz de convolução do sistema, sendo M a ordem do equalizador. Assume-se o sistema como sendo FIR com função de transferência de ordem N e coeficientes $\mathbf{h} = [h_0 \cdots h_{N-1}]^T$. O vetor de correlação cruzada \mathbf{p} no equalizador é dado por:

$$\mathbf{p} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) m^*(n-d)] \quad (3)$$

onde d é o atraso ótimo de equalização. O ponto de mínimo global para a função custo J é:

$$\mathbf{w}_o = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} = \alpha_m^2 (\alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) \mathbf{m}^T(n)] \mathbf{H}^T + \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)] \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) m^*(n-d)] \quad (4)$$

A presença de $\mathbf{t}(n)$ na equação (4) implica em uma dependência da solução de Wiener com relação ao sinal de informação. A seguir, demonstramos como obter a solução que inverte as distorções do sistema.

A. Equalização de Sinais Descorrelacionados

Pelo fato de a marca d'água ter espectro branco e ser normalizada em potência, o termo $E [\mathbf{m}(n) \mathbf{m}^T(n)]$ torna-se uma matriz identidade. Assumindo que o sinal de informação seja descorrelacionado, o termo $E [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)]$ é também uma matriz identidade multiplicada pela variância σ_t^2 de $\mathbf{t}(n)$. Com isso, a matriz \mathbf{R} pode ser reescrita como:

$$\mathbf{R} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{H}^T + \sigma_t^2 \mathbf{H} \mathbf{H}^T = (\alpha_m^2 + \sigma_t^2) \mathbf{H} \mathbf{H}^T \quad (5)$$

Agora, \mathbf{R} não está mais subordinada ao sinal $\mathbf{t}(n)$ (exceto à variância σ_t^2 , que pode ser estimada). Os coeficientes ótimos referentes à solução de Wiener podem ser expressos como:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_o = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} &= \frac{\alpha_m^2}{\alpha_m^2 + \sigma_t^2} (\mathbf{H} \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) m^*(n-d)] \\ \Rightarrow e_o(n) &= \frac{\alpha_m^2}{\alpha_m^2 + \sigma_t^2} t(n) \end{aligned} \quad (6)$$

onde $e_o(n)$ é o sinal de erro na condição ótima. Exceto por um fator de escala, os coeficientes do equalizador tendem a um ponto que inverte a resposta impulsiva do sistema.

B. Equalização de Sinais Correlacionados

Para o caso de sinais de informação correlacionados, tem-se:

$$\mathbf{R} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{H}^T + \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)] \mathbf{H}^T \quad (7)$$

Empregando-se um método de branqueamento, pode-se fazer com que o sistema convirja para a solução de Wiener. No esquema da Fig. 1, é introduzido um filtro de erro de predição na saída do equalizador. Este filtro tem como objetivo branquear o sinal $y(n)$ através da filtragem de suas componentes redundantes (periódicas). A saída do preditor será composta pela parte correlacionada do sinal $y(n)$. Através do cálculo da diferença entre $y(n)$ e o sinal na saída do preditor, obtemos $y'(n)$, que corresponde à parcela descorrelacionada da saída do equalizador. Tem-se assim:

$$y'(n) = y(n) - \sum_{k=1}^P w_{f,k}^* y(n-k-\Delta) \quad (8)$$

onde $w_{f,k}^*$ são os coeficientes do preditor com P elementos de atraso. Como a função custo do equalizador tende a um mínimo, o sinal de erro $y'(n)$ tende às componentes descorrelacionadas do sinal de informação, mais a marca d'água (que é um sinal descorrelacionado). O atraso Δ deve ser grande o suficiente para que o filtro de predição seja capaz de remover a correlação do sinal $y(n)$.

III. IDENTIFICAÇÃO ADAPTATIVA UTILIZANDO MARCA D'ÁGUA

Como no método descrito na seção anterior, uma marca d'água é transmitida continuamente, sobreposta ao sinal de informação, utilizando a técnica de espalhamento espectral. A marca d'água escalonada é utilizada como sinal de referência no filtro equalizador adaptativo, produzindo uma função custo $J = E[|y(n) - d(n)|^2]$. A solução é obtida através da

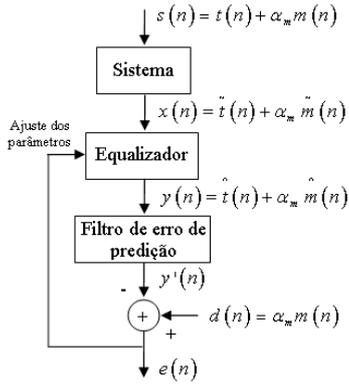


Fig. 1. Esquema de equalização utilizando marca d'água

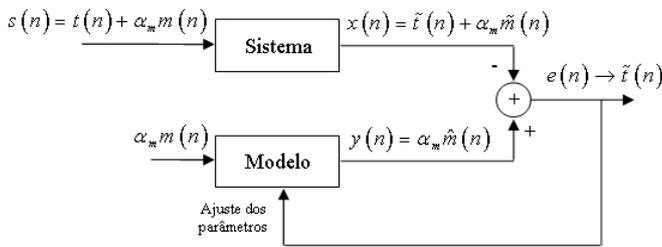


Fig. 2. Esquema de identificação utilizando marca d'água

minimização da função custo com respeito aos coeficientes \mathbf{w} do modelo.

A superfície de erro do critério de Wiener na forma canônica para este sistema pode ser escrita da seguinte forma [7]:

$$J(\mathbf{w}) = \sigma_x^2 - \mathbf{p}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m + (\mathbf{w} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m)^T \mathbf{R}_m (\mathbf{w} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m) \quad (9)$$

onde σ_x^2 é a variância do sinal de referência, e os termos \mathbf{R}_m e \mathbf{p}_m expressam, respectivamente, a autocorrelação e a correlação cruzada do sinal de marca d'água.

Para obter-se o ponto de mínimo na equação (9), o termo $(\mathbf{w} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m)$ deve ser igualado a zero:

$$\mathbf{w}_0 - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{w}_0 = \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m \quad (10)$$

Observa-se que o ponto de mínimo obtido, mostrado na equação (10), depende apenas das características do sinal de marca d'água, bastando o conhecimento prévio deste sinal para que seja possível o ajuste dos coeficientes do modelo. A Fig. 2 ilustra este esquema.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar o desempenho dos métodos apresentados quando aplicados a sistemas variantes no tempo, escolhemos dois cenários baseados em sistemas cujos parâmetros apresentam um comportamento dinâmico. Nas simulações, assumimos que as amostras transmitidas são i.i.d. e pertencentes a uma constelação 2-PAM com módulo unitário. Assumimos que o sistema e o filtro (de identificação ou equalização) são ambos FIR, sem a presença de ruído aditivo.

Para ambos os sistemas analisados, tem-se a seguinte relação entre entrada e saída:

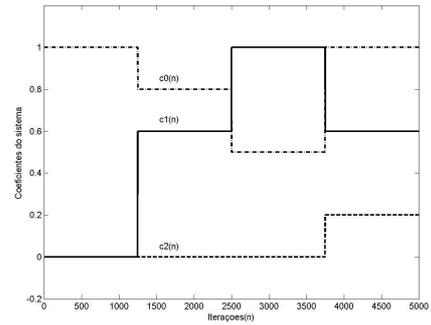


Fig. 3. Coeficientes do sistema baseado em funções degrau.

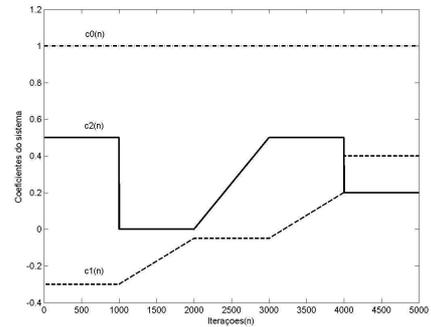


Fig. 4. Coeficientes do sistema baseado em funções degrau e rampa.

$$x(n) = c_0(n) s(n) + c_1(n) s(n-1) + c_2(n) s(n-2) \quad (11)$$

onde $c_0(n)$, $c_1(n)$ e $c_2(n)$ são definidos conforme as Figs. 3 e 4.

Na Fig. 3, o sistema variante é baseado em funções degrau e apresenta as seguintes transições:

- $[c_0(0) \quad c_1(0) \quad c_2(0)] = [1.0 \quad 0.0 \quad 0.0]$;
- $[c_0(1250) \quad c_1(1250) \quad c_2(1250)] = [0.8 \quad 0.6 \quad 0.0]$;
- $[c_0(2500) \quad c_1(2500) \quad c_2(2500)] = [0.5 \quad 1.0 \quad 0.0]$;
- $[c_0(3750) \quad c_1(3750) \quad c_2(3750)] = [1.0 \quad 0.6 \quad 0.2]$;

Na Fig. 4, o sistema é baseado em funções degrau e rampa.

A. Identificação Supervisionada Utilizando Marca d'Água

Nas simulações, adotamos um modelo de identificação $[w_{id1}(0) \quad w_{id2}(0) \quad w_{id3}(0)]$ com três coeficientes. Em todos os casos, os coeficientes foram adaptados pelo esquema de identificação utilizando marca d'água e comparados com os coeficientes originais do sistema.

As Figs. 5, 6 e 7 ilustram a estimativa obtida pelos coeficientes do modelo de identificação através do algoritmo RLS para o sistema degrau, com $\lambda = 0,98$ e uma média de 500 realizações do algoritmo. Podemos ver nas ilustrações que o algoritmo rastreia as variações do sistema, atingindo rapidamente os pontos ótimos de convergência.

As Figs. 8, 9 e 10 ilustram a estimativa obtida pelos coeficientes do modelo de identificação através do algoritmo

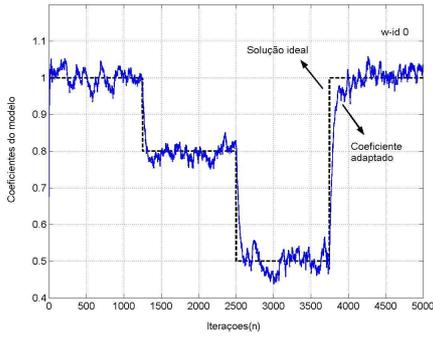


Fig. 5. Coeficiente w_{id0} do modelo de identificação com um sistema variante baseado em degrau.

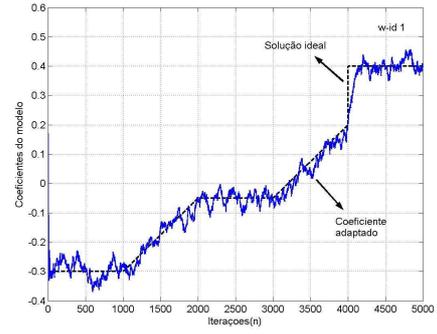


Fig. 9. Coeficiente w_{id1} do modelo de identificação com um sistema variante baseado em degrau-rampa.

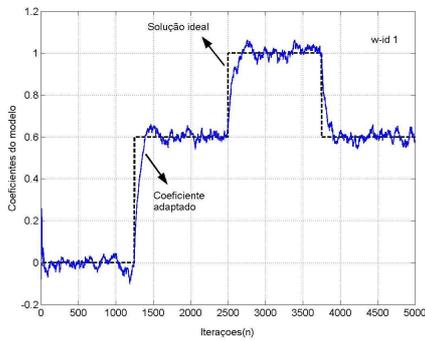


Fig. 6. Coeficiente w_{id1} do modelo de identificação com um sistema variante baseado em degrau.

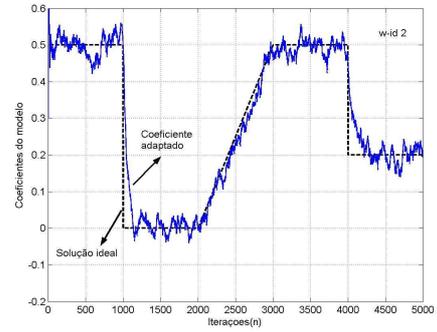


Fig. 10. Coeficiente w_{id2} do modelo de identificação com um sistema variante baseado em degrau-rampa.

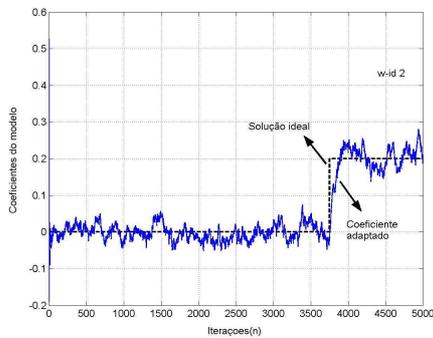


Fig. 7. Coeficiente w_{id2} do modelo de identificação com um sistema variante baseado em degrau.

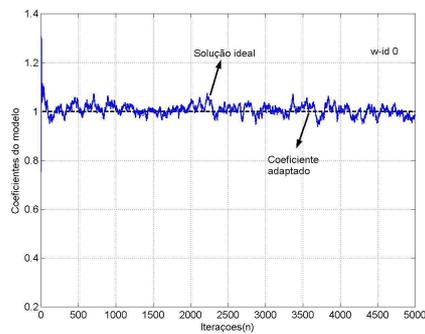


Fig. 8. Coeficiente w_{id0} do modelo de identificação com um sistema variante baseado em degrau-rampa.

RLS para o sistema degrau-rampa, com $\lambda = 0.98$ e uma média de 500 realizações do algoritmo. Como no caso precedente, observa-se que o algoritmo rastreia as variações do sistema, atingindo rapidamente os pontos ótimos de convergência.

Nas simulações realizadas, houve 100% de convergência global e o método mostrou-se bastante robusto quando aplicado a sistemas variantes.

B. Equalização Supervisionada Utilizando Marca d'Água

Nas simulações, adotamos um filtro equalizador $[w_{eq1}(0) \ w_{eq2}(0) \ w_{eq3}(0)]$ com três coeficientes. Em todos os casos, os coeficientes foram adaptados pelo esquema de equalização utilizando marca d'água e comparados com os coeficientes de Wiener (correspondentes ao equalizador ideal) em cada instante de tempo.

As Figs 11, 12 e 13 ilustram a estimativa obtida pelos coeficientes do equalizador através do algoritmo RLS para o sistema variante baseado em funções degrau. As Figs. 14, 15 e 16 ilustram os resultados para o sistema baseado em funções degrau-rampa. Nas duas simulações, foi utilizado um fator de esquecimento $\lambda = 0,98$ e uma média de 500 realizações do algoritmo. Observa-se que o algoritmo rastreia as variações do sistema, atingindo rapidamente os pontos ótimos de convergência.

O algoritmo LMS também foi testado e apresentou resultados próximos aos do RLS. Ambos os algoritmos atingiram rapidamente a convergência, sendo capazes de acompanhar

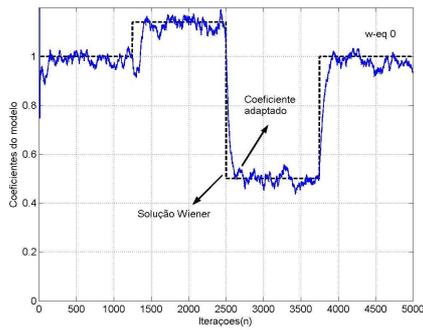


Fig. 11. Coeficiente w_{eq0} do equalizador com um sistema variante baseado em degrau.

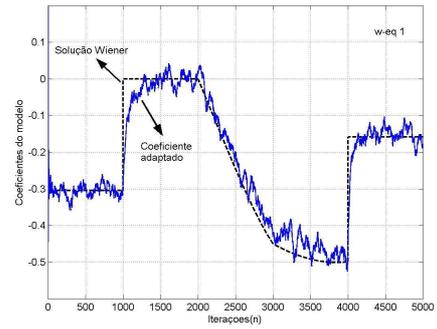


Fig. 15. Coeficiente w_{eq1} do equalizador com um sistema variante baseado em degrau-rampa.

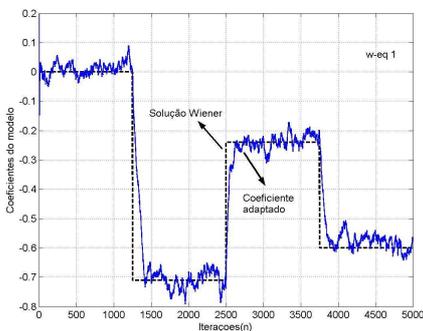


Fig. 12. Coeficiente w_{eq1} do equalizador com um sistema variante baseado em degrau.

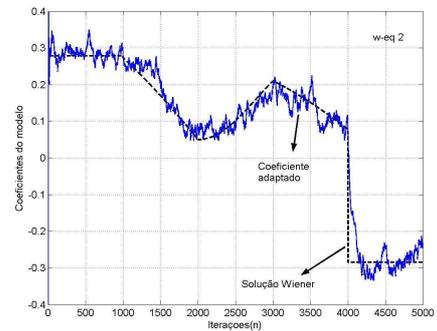


Fig. 16. Coeficiente w_{eq2} do equalizador com um sistema variante baseado em degrau-rampa.

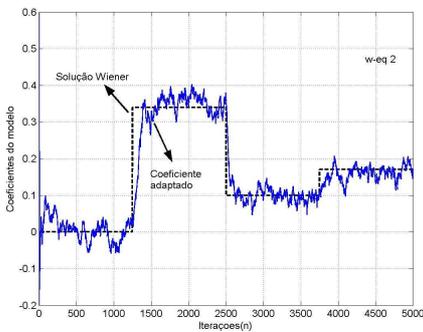


Fig. 13. Coeficiente w_{eq2} do equalizador com um sistema variante baseado em degrau.

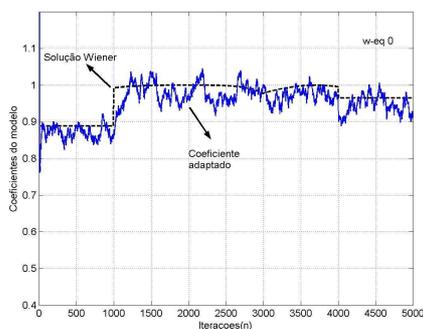


Fig. 14. Coeficiente w_{eq0} do equalizador com um sistema variante baseado em degrau-rampa.

as variações do sistema. No entanto, observou-se que o RLS converge com um menor número de iterações. A velocidade de convergência do LMS pode ser ajustada alterando-se o seu passo de adaptação; no entanto, o aumento do passo leva a um crescimento considerável da oscilação estocástica da saída do algoritmo.

Nas simulações realizadas, houve 100% de convergência global e o método mostrou-se bastante robusto quando aplicado a sistemas variantes no tempo.

V. CONCLUSÕES

Foi introduzida neste artigo uma estratégia supervisionada de filtragem adaptativa baseada no uso de uma marca d'água como sinal de referência, aplicada aos problemas de identificação e equalização em canais FIR variantes no tempo. O método apresentado mostrou-se capaz de rastrear de forma bastante eficiente as variações do sistema ao longo do tempo.

Este método possui algumas vantagens importantes em relação às técnicas utilizadas nos sistemas tradicionais de identificação/equalização, podendo-se destacar a ausência de interrupções na transmissão de informação útil e a baixa complexidade computacional com relação a critérios não-supervisionados.

Perspectivas de trabalhos futuros incluem a implementação de um mecanismo de ajuste automático do fator de esquecimento do algoritmo RLS em função da variabilidade dos parâmetros do sistema. Planeja-se ainda aplicar os métodos

descritos a sinais de áudio e voz; neste caso, será necessário o emprego de modelos psico-acústicos para maximizar a energia da marca d'água sem introduzir degradação perceptível.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Haykin, *Adaptive filter theory*, third edition, Prentice Hall, 1996.
- [2] Cynthia Junqueira, Fabrício O. de França, Romis R. F. Attux, Ricardo Suyama, Leandro N. de Castro, Fernando J. Von Zuben, João Marcos T. Romano, *A Proposal for Blind FIR Equalization of Time-Varying Channels*, Proc. of the IEEE, 2005.
- [3] J. Arenas-García, V. Gómez-Verdejo, M. Martínez-Ramon, A. R. Filgueiras-Vidal, *Separate-Variable Adaptive Combination of LMS Adaptive Filters for Plant Identification*, Proceedings of the IEEE XIII Workshop on Neural Network for Signal Processing, pp. 239-248, Toulouse, 2003.
- [4] A. R. Varma, L. L. H. Andrew, C. R. N. Athaudage, J. H. Manton, *Iterative algorithms for channel identification using superimposed pilots*, Australian Communications Theory Workshop, February, 2004.
- [5] J. K. Tugnait, and W. Luo, *On channel estimation using superimposed training and first-order statistics*, IEEE Communications Letters, vol. 7, no. 9, September, 2003.
- [6] M. Uliani Neto, Leandro de C. T. Gomes, João Marcos T. Romano, and Madeleine Bonnet, *Adaptive equalization based on watermarking*, VI International Telecommunications Symposium (ITS2006), September, Fortaleza, Brazil, 2006.
- [7] M. Uliani Neto, *Identificação e Equalização em Sistemas Adaptativos Utilizando Marca d'Água Digital*, Tese de Mestrado, Unicamp, defesa prevista para 2º semestre de 2007.